

EL NIÑO 2026-2027 QUÉ ESPERAR EN EL SUR DE CHILE Y CÓMO LLEGAR PREPARADOS

El Niño ya se instaló y la NOAA proyecta un 63% de probabilidad de un evento “muy fuerte” hacia el verano austral. Frente a esto, la pregunta ya no es si llegará el evento El Niño, si no con que intensidad y qué significa para el clima, el agua, las floraciones algales y la salud de los peces. Esta nota resume lo qué está ocurriendo en el océano y la atmósfera, qué nos enseñó el evento de 2016 y qué medidas concretas conviene tomar hoy.

David Cassis ¹, José Garcés-Vargas ², Marcos Godoy ³, Rudy Suarez ⁴, Diego Caro ⁴.

¹. AquaBC, Puerto Varas, Chile.

². Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, Chile.

³. Laboratorio de Biotecnología Aplicada, Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad San Sebastián, Sede de la Patagonia, Lago Panguipulli 1390, Puerto Montt 5501842, Chile.

⁴. Centro de Investigaciones Biológicas Aplicadas (CIBA), Puerto Montt, Chile.

1. Evento El Niño (ENSO) y proyecciones para la temporada 2026-2027

1.1. Monitoreo Global y Proyecciones en el Pacífico Ecuatorial

Al 6 de julio de 2026, NOAA mantiene el sistema bajo Advertencia de El Niño. La anomalía de temperatura superficial en la región Niño 3.4 se ubica en $+1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en la franja costera Niño 1+2 alcanza $+2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, con el índice acoplado RONI ya en el umbral de fase cálida (NOAA, 2026). Los modelos dinámicos (CFSv2) proyectan intensificación sostenida hacia el trimestre noviembre-enero, con un 63% de probabilidad de un evento “muy fuerte” ($\geq +2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$) que lo situaría entre los mayores registrados desde 1950 (NOAA, 2026).

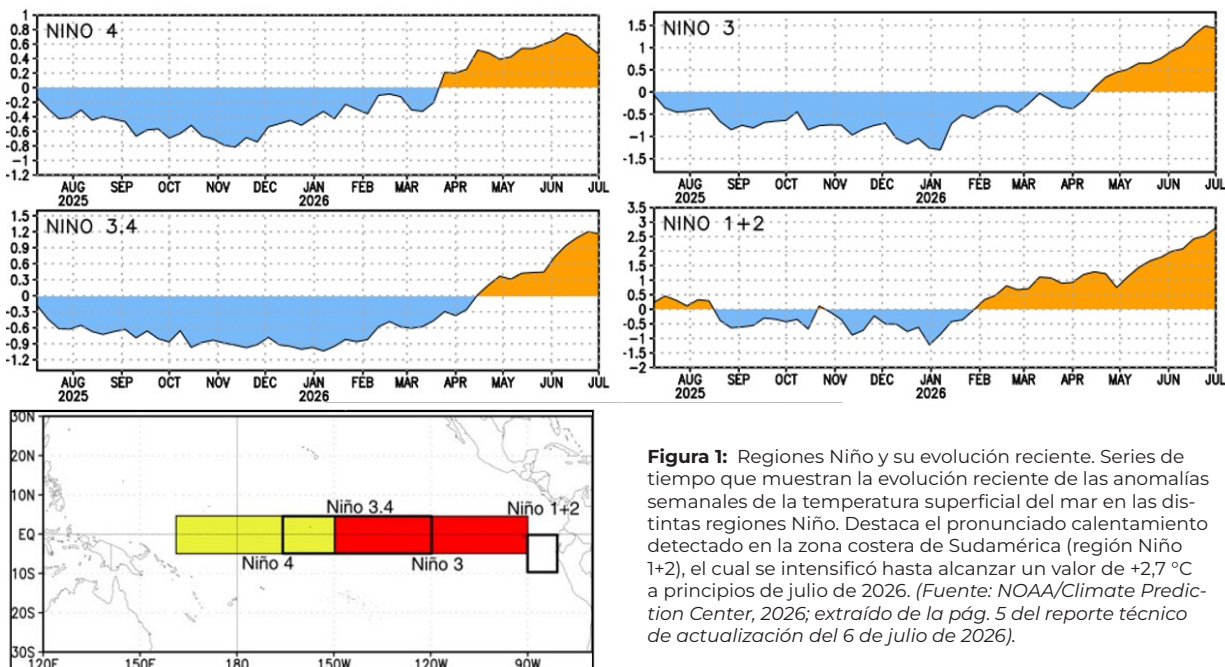
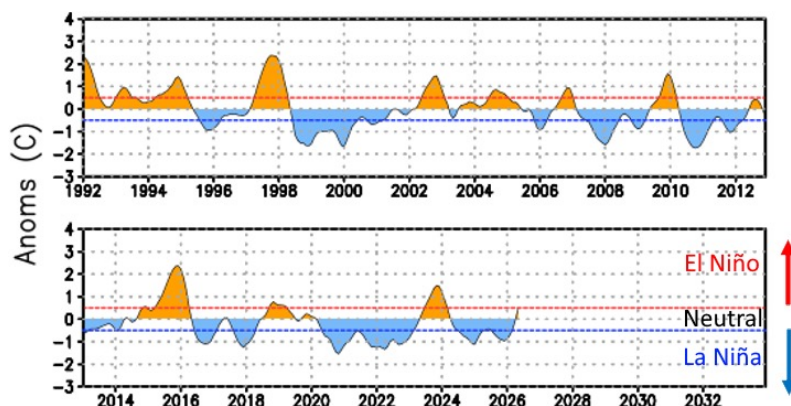


Figura 2: Evolución histórica del índice RONI desde 1992. Registro histórico reciente del Índice relativo Oceánico El Niño (RONI) utilizado para contextualizar la magnitud de los eventos climáticos. El gráfico ilustra que para el trimestre móvil de abril-junio de 2026, el indicador ascendió oficialmente a $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, alcanzando de forma formal el umbral operativo de la fase cálida. (Fuente: NOAA/Climate Prediction Center, 2026; extraído de la pág. 21 del reporte técnico de actualización del 6 de julio de 2026).



De cara a los próximos meses, los modelos dinámicos de simulación ratifican la persistencia y el fortalecimiento progresivo de un evento El Niño (NOAA, 2026). El Sistema de Pronósticos del Clima de NCEP (CFSv2), actualizado al 6 de julio, proyecta un incremento sostenido de las anomalías de la TSM en el Pacífico central y oriental durante los trimestres de julio-agosto-septiembre y noviembre-diciembre-enero de 2026/2027, donde se prevé que las anomalías superen los +2,0 °C y +3,0 °C, respectivamente (Figura 3) (Comité Regional ERFEN, 2026; NOAA, 2026).

Si bien la intensidad de un evento no se traduce de manera lineal en impactos climáticos idénticos en todas las regiones, un evento de estas magnitudes inclina significativamente las probabilidades a favor de escenarios meteorológicos extremos a escala global (NOAA, 2026).

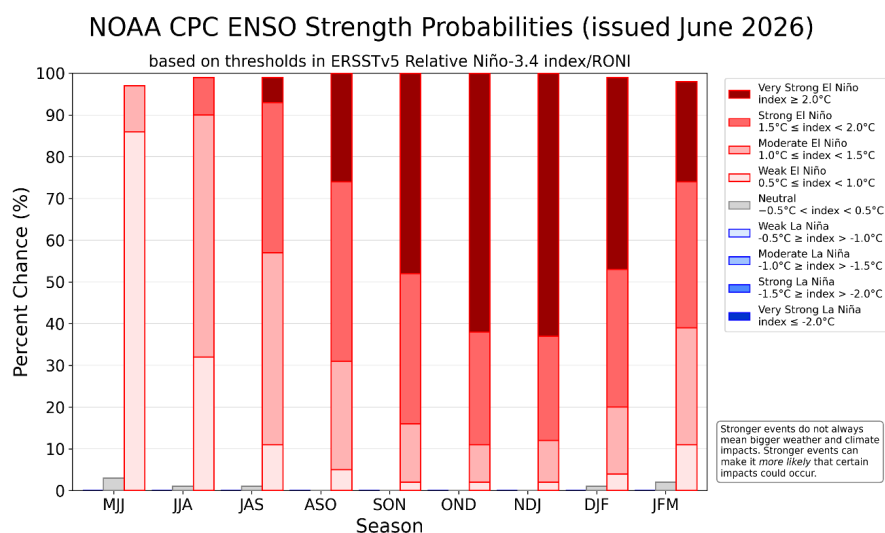


Figura 3: Probabilidades oficiales de intensidad de El Niño. Gráfico probabilístico de la NOAA que estima la categoría de intensidad que adoptará el evento El Niño a lo largo de su ciclo de vida. Resalta que para el trimestre móvil de noviembre-enero existe un 63% de probabilidad de que El Niño evolucione hacia una categoría “muy fuerte” (índice $\geq +2,0$ °C), lo que podría posicionarlo entre los eventos más grandes registrados en la historia moderna. (Fuente: NOAA/Climate Prediction Center, 2026; extraído de la pág. 24 del reporte técnico de actualización del 6 de julio de 2026).

1.2. Condiciones climáticas observadas a nivel local

A pesar de la intensificación global de El Niño, las regiones del sur de Chile experimentaron una anomalía térmica negativa durante el mes de mayo, mostrando un comportamiento más bien frío. En la costa, el agua del mar registró temperaturas levemente más bajas de lo habitual. Este enfriamiento marino estuvo acompañado por una falta importante de lluvias en las ciudades, con un déficit de agua que varió entre el 26% y el 100% en localidades como Valdivia, Osorno, Puerto Montt, Coyhaique y Balmaceda (Comité Regional ERFEN, 2026).

La sequía tuvo un origen atmosférico. Durante mayo de 2026, la presión media a nivel del mar frente al sur de Chile (41°S-45°S / 78°W-72°W) alcanzó un máximo histórico, con anomalías sobre +6,0 hPa asociadas al Anticiclón del Pacífico Sur. Este bloqueo de altas presiones desplazó los frentes de lluvia hacia latitudes polares e impidió el ingreso de tormentas a la zona centro-sur, dejando a Los Ríos y Aysén bajo un régimen seco (Comité Regional ERFEN, 2026; Bureau of Meteorology, 2026). Hacia el cierre del año se espera que el acoplamiento de El Niño con estos patrones de alta latitud facilite la normalización de las precipitaciones (NOAA, 2026).

A pesar de este inicio de invierno seco y frío, los pronósticos climáticos prevén que, a medida que los efectos de El Niño comiencen a estabilizarse en el océano, se produzca una transición gradual hacia meses más húmedos (Comité Regional ERFEN, 2026; NOAA, 2026). En cuanto a las lluvias, se proyectan que las precipitaciones estarán sobre lo normal en zonas costeras (Comité Regional ERFEN, 2026).

2. El Niño 2015-2016 y el Modo Anular del Sur (SAM): Contexto Climático a Gran Escala.

Durante el verano austral de 2016, el centro-sur de Chile y la Patagonia occidental experimentaron una anomalía climática de magnitud histórica. Este escenario fue gatillado principalmente por la superposición de dos eventos climáticos en fases extremas: un evento de El Niño de intensidad excepcional y la fase positiva más alta registrada en el SAM (León-Muñoz et al. 2018; Garreaud 2018).

Mientras que El Niño generó teleconexiones atmosféricas desde el Pacífico ecuatorial, el SAM, cuya tendencia persistente hacia la polaridad positiva se asocia al cambio climático, dominó la circulación extratropical. Esta coincidencia de fases positivas generó una cuña anticlónica (bloqueo atmosférico de alta presión) de gran persistencia frente a las costas de Chile, desviando las tormentas y debilitando de forma drástica los vientos del oeste (westerlies) que normalmente abastecen de lluvias a la región (León-Muñoz et al. 2018; Garreaud 2018).

2.1. Bloqueo Hidrometeorológico en la Patagonia Occidental

El bloqueo de los sistemas frontales transformó radicalmente las condiciones de esta zona hiperhúmeda. Se registró la sequía más grave del registro instrumental, con déficits de precipitaciones superiores al 50% entre los 40°S y 47°S (Figura 4). Asimismo, la ausencia de tormentas y cielos despejados provocó un aumento del 30% en la radiación solar que incidió directamente sobre la superficie del mar (León-Muñoz et al. 2018; Garreaud 2018).

La respuesta de las cuencas hidrográficas locales fue inmediata. Los ríos de la Patagonia norte experimentaron descensos históricos en sus caudales debido a la sequía pluvial. El río Puelo, que ejerce un rol regulador crítico en los niveles de agua dulce del mar interior de Chiloé, aportó en marzo de 2016 un caudal medio inferior a la mitad de su promedio histórico base ($175 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ frente a los $360 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ históricos). Esta drástica disminución en las descargas fluviales alteró radicalmente la física de la columna de agua marina (León-Muñoz et al. 2018).

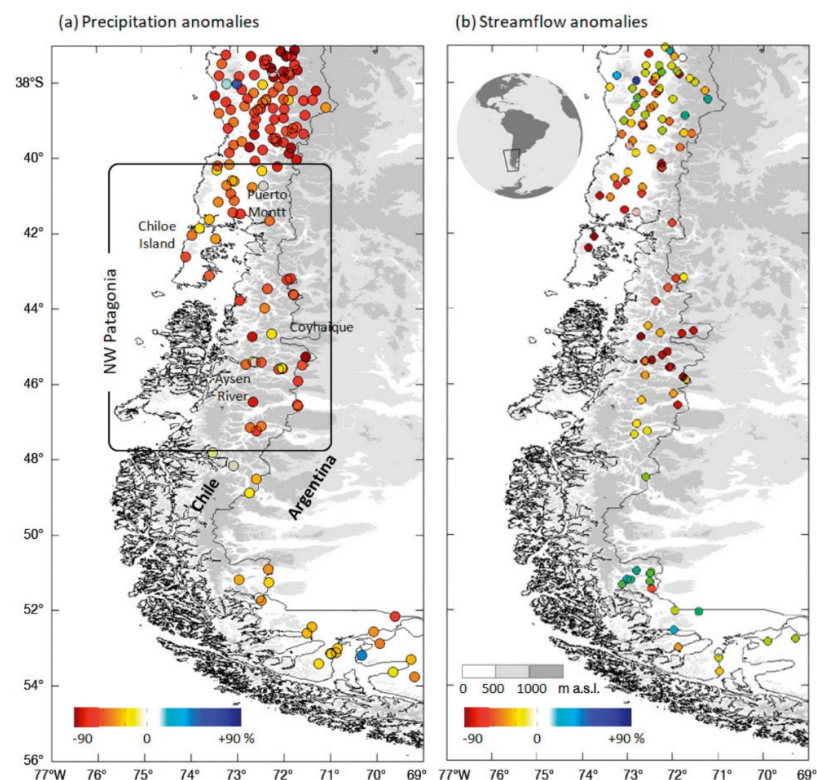


Figura 4: Distribución espacial de anomalías hidrometeorológicas en la Patagonia chilena durante el trimestre enero-febrero-marzo (JFM) de 2016. (a) Anomalías de precipitación: Puntos de colores que representan el porcentaje de desviación respecto a la climatología histórica (1980-2010), evidenciando déficits severos de hasta el 90% (tonalidades rojas y anaranjadas) concentrados críticamente en el sector noroccidental de la Patagonia. (b) Anomalías de caudal (streamflow): Desviación en el caudal de los ríos de la región, reflejando una reducción drástica y generalizada del flujo de agua dulce hacia los sistemas estuarinos y mar interiores del sur de Chile. (Fuente: Garreaud, 2018).

2.2. Respuesta Oceanográfica Local: Ruptura de la Estratificación Halina

Los sistemas de fiordos y canales chilenos funcionan normalmente bajo un régimen estuarino caracterizado por una marcada y casi permanente estratificación halina. Una capa superficial de baja salinidad, alimentada por ríos y lluvias, actúa como una barrera natural que bloquea la mezcla vertical con las aguas profundas de origen oceánico (León-Muñoz et al. 2018).

En el verano de 2016, la falta de aportes de agua dulce desestabilizó por completo este equilibrio físico. En los primeros 1 a 5 metros de la columna de agua, la estabilidad (Frecuencia de Brunt-Väisälä) disminuyó prácticamente a la mitad en comparación con periodos normales. Por otra parte, la drástica reducción del caudal estuarino causó la desaparición del gradiente halino superficial, elevando la salinidad superficial sobre 30 psu. Al colapsar la barrera de agua dulce, se facilitó la intrusión y advección vertical frecuente de masas de agua densas, salinas y ricas en nutrientes desde capas profundas hacia la superficie. Finalmente, la fuerte insolación recibida calentó la capa superficial desprotegida, alcanzando temperaturas inusuales de entre 15 °C y 16 °C (León-Muñoz et al. 2018).

3. Floraciones Algales Nocivas (FAN)

Los ciclos asociados al evento El Niño generan cambios significativos en las comunidades fitoplanctónicas de la costa de Chile, modificando su composición, productividad y dinámica estacional. Estas condiciones se asocian con una disminución de la productividad primaria, alteraciones en la estructura de tamaños del fitoplancton y un aumento en la frecuencia, intensidad y diversidad de las floraciones algales nocivas (FAN) (Muñoz, 1987; Cassis et al., 2002; Iriarte y González, 2004).

El aumento de la temperatura superficial, la mayor estratificación de la columna de agua y la disminución de las surgencias costeras reducen la disponibilidad de nutrientes en la capa superficial. Estas condiciones favorecen el predominio de organismos flagelados, principalmente dinoflagelados y rafidofíceas, por sobre las diatomeas. Debido a que estos grupos incluyen numerosas especies productoras de toxinas e irritantes, las floraciones que ocurren durante este período presentan un mayor riesgo de cierres extractivos por toxinas en moluscos y de eventos de mortalidad masiva en la salmonicultura.

Su magnitud de los cambios en las comunidades fitoplanctónicas durante los eventos El Niño depende de la intensidad. Los episodios cálidos más intensos, como los registrados en 1998 y 2016, favorecieron cambios poblacionales significativos, incluyendo floraciones algales uniespecíficas de gran escala, una mayor frecuencia, duración y extensión de estos eventos, así como la aparición y expansión de especies poco comunes hacia nuevas áreas (Cassis et al., 2002; Iriarte y González, 2004; Montes et al., 2018).

Un ejemplo relevante para la salmonicultura y la mitilicultura es el dinoflagelado *Alexandrium catenella*, especie productora de veneno paralizante de los mariscos (VPM) y compuestos irritantes, como especies reactivas de oxígeno (ROS). Durante el evento El Niño de 1998, esta especie experimentó una importante expansión de su distribución geográfica, históricamente restringida a Magallanes y el sur de Aysén, registrándose floraciones en la Región de Aysén y, por primera vez, en Quellón. Estas floraciones se extendieron entre octubre de 1998 y febrero de 1999, afectando principalmente la actividad pesquera artesanal (Guzmán et al., 2002). Posteriormente, durante el evento extremo de 2016, *A. catenella* alcanzó una distribución sin precedentes, extendiéndose desde la Región de Aysén hasta las cercanías de Concepción. La elevada acumulación de VPM en mariscos provocó la interrupción de las actividades de pesca artesanal y mitilicultura, mientras que en la salmonicultura se reportaron mortalidades asociadas directamente a esta floración (Buschmann et al., 2016; Villanueva et al., 2017). Asimismo, este evento se ha relacionado con la mortalidad masiva de ballenas registrada en el Golfo de Penas, atribuida a la exposición a VPM durante su desplazamiento hacia áreas donde las floraciones de *A. catenella* fueron más intensas (Häussermann et al., 2017). Estos antecedentes evidencian que los eventos cálidos extremos pueden favorecer la expansión geográfica e incrementar el impacto ecológico, sanitario y productivo de esta especie en el sur de Chile.

Otro ejemplo de eventos FAN que ha generado impactos para la salmonicultura cuando se ha establecido

bajo condiciones anómalas es el caso *Pseudochattonella* spp.. Especie flagelada altamente productora de ROS, que había sido detectada en floraciones limitadas desde el año 2004 con extensión y con daños limitados, sin embargo, año 2016 presentó una floración de abundancia extrema (hasta 27.000 células por ml) que produjo mortalidades masivas en la región de Los Lagos. Actualmente esta especie es una de las principales preocupaciones de la industria por su alta nocividad y hábitos estuarinos (Villanueva et al., 2017).

Para el evento cálido de este año se estima que hay una alta probabilidad de floraciones algales de *Alexandrium catenella* y *Pseudochattonella* spp. debido a sus preferencias por ambientes estuarinos con estratificación térmica fuerte. Al contrario, no se esperan eventos de gran escala de *Heterosigma akashiwo* debido a las alteraciones en el régimen hídrico usualmente observado durante El Niño (menor pluviosidad) y su preferencia por ambientes estratificados por salinidad.

4. Salud y bienestar animal

El agua es el principal indicador indirecto del bienestar animal para las especies hidrobiológicas. Por ello, cualquier evento, de origen natural o antrópico, que altere su calidad impactará los parámetros de salud y bienestar de los peces, y desde ahí en el rendimiento productivo, donde las mermas pueden ir desde una menor eficiencia productiva hasta la mortalidad directa. En este escenario, los eventos climáticos de gran escala como El Niño se han consolidado como variables de riesgo que deben incorporarse de forma explícita al evaluar impactos productivos. Frente a ellos, el monitoreo continuo y la adaptación oportuna de los protocolos de manejo son claves para mantener a los peces dentro de sus rangos de tolerancia y permitirles expresar su potencial productivo.

En los salmónidos, la branquia es mucho más que un órgano respiratorio, constituye la principal interfaz entre el pez y su medio, ya que concentra el intercambio gaseoso, la osmorregulación, la regulación ácido-base y la excreción de desechos nitrogenados (Evans et al., 2005). Al estar en contacto directo y permanente con el agua, la branquia “censa” de manera continua las condiciones del entorno y responde a múltiples estresores de naturaleza física (temperatura, sólidos suspendidos), química (concentración de gases y nutrientes) o biológica (fito y zooplancton). Frente a estas el tejido branquial reacciona, sin embargo, la capacidad de respuesta es limitada. El tipo y la severidad de esta respuesta esta directamente ligada al tipo y magnitud del cambio en la calidad del agua que se genere. Así, se distinguen dos tipos de respuesta, las agudas que se desarrollan en minutos hasta horas y las crónicas que se desarrollan en días a meses. Con frecuencia ambos tipos de respuestas o cambios coexisten. Estas pueden observarse tanto a nivel macroscópico (inspección clínica a simple vista) como microscópico (histopatología), y ambos niveles deben ponderarse a la hora de determinar un diagnóstico de causas ambientales (Adams et al., 2004; Mitchell et al., 2012; Østevik et al., 2022).

Los cambios agudos se evidencian clínicamente por el aumento de la mucosidad branquial y la presencia de focos hemorrágicos en los filamentos. Este hallazgo puede confirmarse in situ mediante un frotis fresco de branquia, técnica rápida y confiable para detectar con mayor precisión la presencia de trastornos subclínicos. Los trastornos crónicos, en cambio, se caracterizan por el engrosamiento de los filamentos, cambios de coloración o parches blanquecinos, asociados a hiperplasia y fusión lamela, y en los casos más severos, erosión y pérdida de la continuidad del tejido branquial (Adams et al., 2004).

La histopatología aporta una mayor sensibilidad diagnóstica permitiendo detectar lesiones que pasan inadvertidas en la inspección macroscópica e, incluso, anticipar el desarrollo de cuadros crónicos o severos cuando se aplica como vigilancia sistemática (Mitchell et al., 2012). De hecho, la evidencia muestra que pueden existir lesiones histológicas significativas en peces sin signos macroscópicos evidentes, por lo que apoyarse únicamente en la inspección visual tiende a subestimar el problema (Adams et al., 2004; Østevik et al., 2022). En Chile se han adaptado sistemas de puntuación (scoring) branquial macroscópico para el seguimiento de la enfermedad branquial en centros de engorda, lo que ayuda a estandarizar estas observaciones en terreno y determinar el estatus epidemiológico de la enfermedad.

Por último, conviene recordar que muchos cuadros branquiales en el mar no obedecen a una sola causa.

La enfermedad branquial es un síndrome multifactorial en el que factores físicos, químicos o biológicos predisponen al tejido y abren la puerta a agentes infecciosos. Suele presentarse con mayor severidad en la segunda mitad del ciclo productivo y se asocia a temperaturas más altas (Herrero et al., 2018; Boerlage et al., 2020). En el contexto de El Niño, la coincidencia de aguas más cálidas, mayor estratificación y probabilidad de FAN configura un escenario especialmente propicio para este tipo de cuadros.

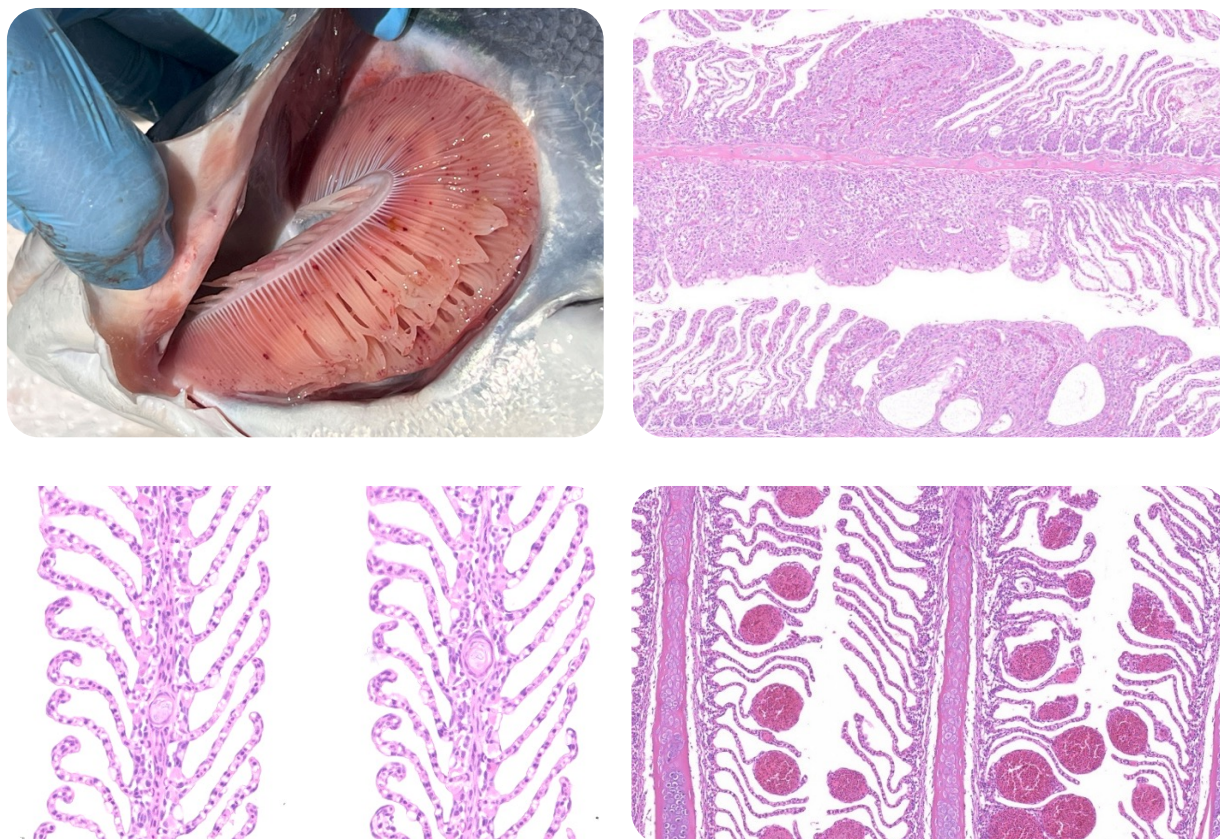


Figura 5: Branquia, trastornos agudos. A) Patología macroscópica. Se observa palidez branquial y múltiples focos hemorrágicos, respuesta de tipo aguda asociada a evento ambiental por exposición a fitoplancton. B) Histopatología, tinción H&E (52X). Tejido branquial sin alteraciones morfológicas. C) Histopatología, tinción H&E (100X). Cambios adaptativos (hiperplasia de células epiteliales y fusión de lamelas secundarias) y circulatorios (congestión y edema lamelar). D) Histopatología, tinción H&E (100X). Trastornos circulatorios asociado a focos de hemorragia o telangiectasia lamelar.

4.1. Impactos sanitarios

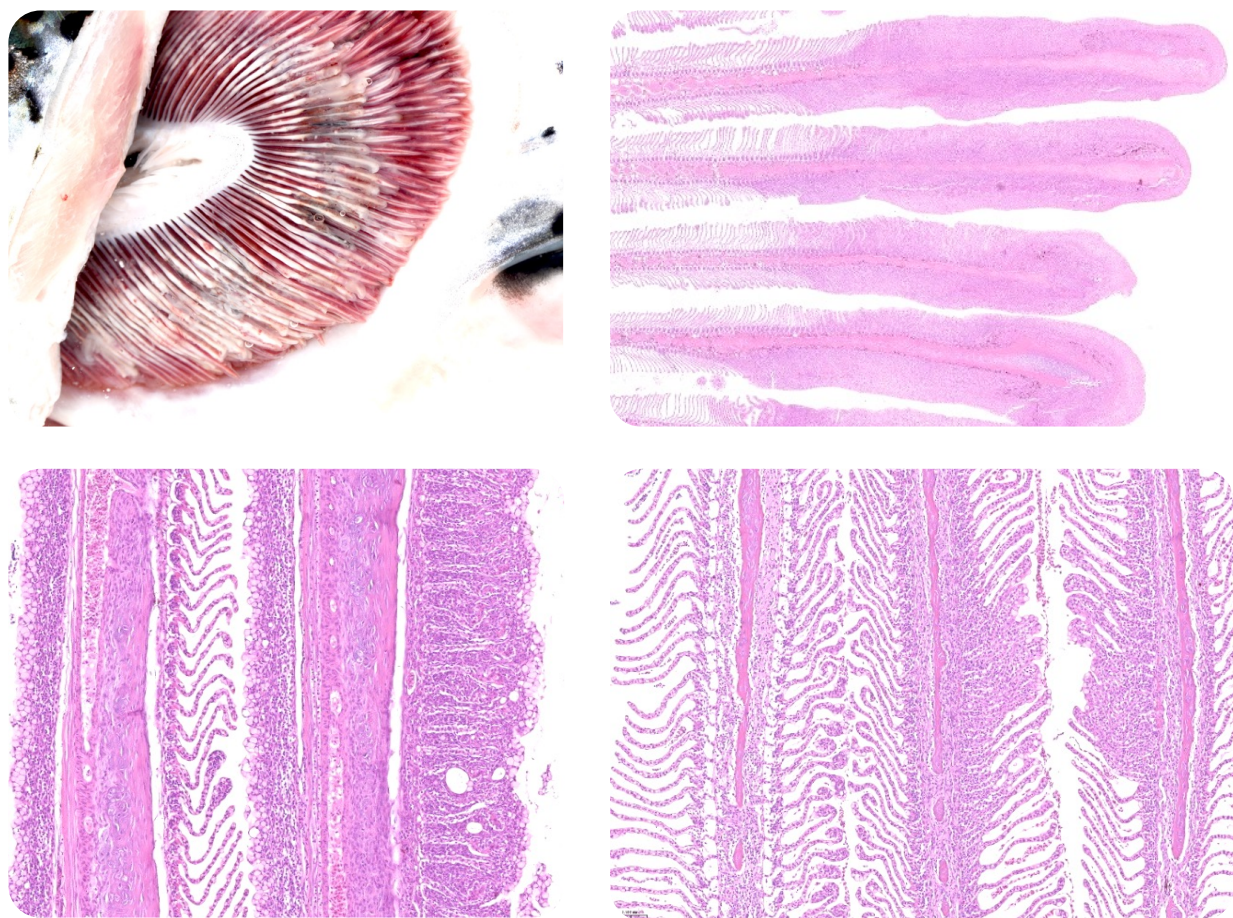


Figura 6: Branquia, trastornos subagudos a crónicos. A) Patología macroscópica. Se observa pérdida de la continuidad o erosión de filamentos branquiales asociado a engrosamiento y cambio de coloración de filamentos branquiales. B) Histopatología, tinción H&E (20X). Se observa engrosamiento de filamentos branquiales asociado a hiperplasia con fusión interlamelar. C) y D) Histopatología, tinción H&E (20X). tejido branquial presenta cambios adaptativos como (hiperplasia de células epiteliales y fusión de lamelas secundarias, y circulatorios (congestión, edema y telangiectasia lamelar).

- **Hipoxia y estrés Metabólico:** El agua más cálida retiene menos oxígeno disuelto, justo cuando el pez eleva su demanda metabólica. El óptimo de crecimiento del salmón del Atlántico se sitúa en torno a 10,5-14 °C; por sobre ese rango la tasa metabólica se incrementa, mientras el apetito y el crecimiento decaen, y los peces tienden a evitar activamente aguas superiores a 16 C (Handeland et al., 2008; Stehfest et al., 2017). Esta combinación, mayor demanda y menor disponibilidad de oxígeno, limita el margen aeróbico y predispone a cuadros de estrés por hipoxia, sobre todo en las horas de mayor temperatura o tras la alimentación.

Estos factores impactan directamente en la condición sanitaria y favorecen los dos principales desafíos que enfrenta hoy la salmonicultura chilena: la Piscirickettsiosis (SRS) y la Caligidosis.

- **Piscirickettsiosis:** La temperatura del agua es uno de los principales determinantes de la prevalencia de SRS, y los eventos cálidos suelen coincidir con brotes de *Piscirickettsiosis*, lo que reduce la eficacia

de los tratamientos antimicrobianos (Rozas-Serri, 2022).

- **Caligidiosis:** La infestación por caligus corresponde a uno de los mayores factores de riesgo de infecciones bacterianas secundarias durante el ciclo de cultivo en agua de mar, dado que las lesiones cutáneas y la inmunosupresión inducidas por el parásito incrementan la susceptibilidad del hospedador a patógenos como *Piscirickettsia salmonis* (Lhorente et al., 2014), cuya coinfección eleva significativamente la mortalidad. El ciclo de vida de *Caligus rogercresseyi* es termodependiente (González & Carvajal, 2003). Las anomalías térmicas positivas acortan el tiempo de desarrollo de los estadios larvales (de nauplio a copepódito infectante) y elevan su tasa metabólica, lo que puede traducirse en infestaciones más rápidas y de mayor intensidad (Montory et al., 2020).

5. Recomendaciones

Ante el pronóstico de un evento El Niño muy fuerte para el periodo 2026-2027, se sugiere reforzar las siguientes ejes estratégicos:

5.1. Monitoreo ambiental

- Mantener el muestreo de fitoplancton en la columna de agua (0, 5, 10 y 15 m), a lo menos dos veces al día, con metodologías estándar validadas (Yarimizu et al., 2020). Análisis que permitan la identificación correcta de los microorganismos en toda escala de tamaños (desde 2µm para monitoreo de *Thalassiosira pseudonana* hasta colonias de 1-2mm de *Phaeocystis spp.*
- Aumentar frecuencia del monitoreo en función al riesgo.
- Refuerzo en capacitación de los analistas de plancton, particularmente de especies nocivas de difícil identificación.
- Equipar y capacitar a personal del centro con sistemas de colecta de muestras.
- Reforzar o implementar sistemas de monitoreo ambiental (oxígeno, salinidad, temperatura y clorofila) por cada unidad de cultivo e integrarlo a los sistemas de alerta temprana.
- Asegurar la operatividad de los sistemas de monitoreo ambiental.
- Revisar y actualizar planes de contingencia frente a eventos FAN, como la cosecha temprana o el traslado de peces a zonas no afectadas.
- Preparar medidas de vigilancia y contingencia dependientes de la especie causante, por ejemplo, con sistemas de oxigenación para hacer frente a floraciones de alta biomasa formadas por *Lepidodinium chlorophorum*. Estos sistemas no se deben utilizar frente a floraciones de organismos productores de especies reactivas de oxígeno, como *Pseudochattonella*, para evitar la ruptura de las células algales y la emisión de sus toxinas al agua.

5.2. Monitoreo sanitario

- Integrar la vigilancia de bienestar animal (branquias, piel y factor de condición) y de la condición fisiológica general con técnicas de laboratorio de alta resolución (histopatología, hematología, bioquímica sanguínea y/o qPCR). Estas herramientas complementarias son esenciales para un abordaje sanitario preventivo frente a estresores ambientales (Boerlage et al., 2020).
- Refuerzo y capacitación a personal de centros de cultivo en necropsia, toma de muestras, clasificación de mortalidad e indicadores operativos de bienestar animal útiles para la vigilancia en los centros de cultivo.

5.3. Evaluación productiva

- Propender a mantener buena calidad de Smolt enviado a agua de mar a través de una buena condición sanitaria, inmunización, condiciones de manejo, homogeneidad de lotes, condición física general y smoltificación.
- Asegurar la operatividad de los sistemas de monitoreo ambiental mitigación, como difusores de oxígeno y/o cortinas de burbujas.
- Estrategias de ayuno. Establecer protocolos de alimentación restrictiva ante alertas de microalgas tóxicas o nocivas y ante caídas de Oxígeno.
- Evaluar una reducción preventiva de la densidad de cultivo y/o el adelanto de cosecha en centros históricamente sensibles a FAN o a eventos ambientales.
- Revisar los planes de contingencia frente a eventos que requieran cosecha temprana de biomásas comerciales en barrios de alto riesgo, asegurando la capacidad logística de wellboats.

6. Referencias bibliográficas:

1. Adams, M. B., Ellard, K., & Nowak, B. F. (2004). Gross pathology and its relationship with histopathology of amoebic gill disease (AGD) in farmed Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Journal of Fish Diseases*, 27(3), 151–161. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2004.00550>
2. Anderson, D. M., Cembella, A. D., & Hallegraeff, G. M. (2012). Progress in understanding harmful algal blooms: Paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management. *Annual Review of Marine Science*, 4, 143–176. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081121>
3. Boerlage, A. S., Ashby, A., Herrero, A., Reeves, A., Gunn, G. J., & Rodger, H. D. (2020). Epidemiology of marine gill diseases in Atlantic salmon (*Salmo salar*) aquaculture: A review. *Reviews in Aquaculture*, 12(4), 2140–2159. <https://doi.org/10.1111/raq.12426>
4. Buschmann, A., Farías, L., Tapia, F., Varela, D., & Vásquez, M. (2016). Informe final Comisión Marea Roja [Reporte técnico]. Universidad de Concepción
5. Cassis, D., Muñoz, P., & Avaria, S. (2002). Variación temporal del fitoplancton entre 1993 y 1998 en una estación fija del seno Aysén, Chile (45°26'S 73°00'W). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 37(1), 43–65.
6. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2026). Análisis de eventos cálidos y sequía en la Patagonia chilena. Universidad de Chile. <https://www.cr2.cl/> Climate Prediction Center (CPC). (2026). El Niño/Oscilación del Sur (ENSO): Discusión diagnóstica.
7. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/> Comité Regional ERFEN. (2026). Boletín de Alerta Climático (BAC) Nro. 428. Comisión Permanente del Pacífico Sur (CPPS). <https://cpps-int.org/index.php/nodo-de-conocimiento/nodo-oceano/bac>
8. Evans, D. H., Piermarini, P. M., & Choe, K. P. (2005). The multifunctional fish gill: Dominant site of gas exchange, osmoregulation, acid-base regulation, and excretion of nitrogenous waste. *Physiological Reviews*, 85(1), 97–177. <https://doi.org/10.1152/physrev.00050.2003>
9. Fajei, E., Whyte, S. K., Soto-Dávila, M., Eslamloo, K., Groves, L., Storey, K., Ghanei-Motlagh, R., Groman, D. B., Purcell, S. L., & Fast, M. D. (2026). Impact of co-exposure to *Chaetoceros* spp. and *Tenacibaculum maritimum* on Atlantic salmon (*Salmo salar*) gills. *Aquaculture*, 614, 120502. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.120502>
10. Garreaud, R. D. (2018). Record-breaking climate anomalies lead to severe drought and environmental

- disruption in western Patagonia in 2016. *Climate Research*, 74(3), 217–229. <https://doi.org/10.3354/cr01505>
11. Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3–4), 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>
 12. González, L., & Carvajal, J. (2003). Life cycle of *Caligus rogercresseyi* (Copepoda: Caligidae) parasite of Chilean reared salmonids. *Aquaculture*, 220(1–4), 101–117. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00512-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00512-4)
 13. Guzmán, L., Pacheco, H., Pizarro, G., & Alarcón, C. (2002). *Alexandrium catenella* y veneno paralizante de mariscos en Chile. En E. A. Sar, M. E. Ferrario, & B. Reguera (Eds.), *Floraciones algales nocivas en el cono sur americano* (pp. 149–170). INESGAL.
 14. Handeland, S. O., Imsland, A. K., & Stefansson, S. O. (2008). The effect of temperature and fish size on growth, feed intake, food conversion efficiency and stomach evacuation rate of Atlantic salmon post-smolts. *Aquaculture*, 283(1–4), 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.06.042>
 15. Herrero, A., Thompson, K. D., Ashby, A., Rodger, H. D., & Dagleish, M. P. (2018). Complex gill disease: An emerging syndrome in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Journal of Comparative Pathology*, 163, 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.jcpa.2018.07.004>
 16. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
 17. Hurtado, M. A. (2018). Phytoplankton response to a weak El Niño event. *Ecological Indicators*, 92, 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.064>
 18. Instituto de Fomento Pesquero (IFOP). (2025). Programa de manejo y monitoreo de las floraciones algales nocivas (FAN) en el sur de Chile. <https://www.ifop.cl/>
 19. Iriarte, J. H., & González, H. E. (2004). Phytoplankton size structure during and after the 1997/1998 El Niño in a coastal upwelling area of the northern Humboldt Current System. *Marine Ecology Progress Series*, 269, 83–90. <https://doi.org/10.3354/meps269083>
 20. León-Muñoz, J., Urbina, M. A., Garreaud, R., & Iriarte, J. L. (2018). Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Scientific Reports*, 8(1), 1330. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19461-4>
 21. Lhorente, J. P., Gallardo, J. A., Villanueva, B., Carabaño, M. J., & Neira, R. (2014). Disease resistance in Atlantic salmon (*Salmo salar*): Coinfection of the intracellular bacterial pathogen *Piscirickettsia salmonis* and the sea louse *Caligus rogercresseyi*. *PLOS ONE*, 9(4), e95397. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095397>
 22. Mardones, J. I., Dorantes-Aranda, J. J., Escibano, M. E., Iriarte, J. L., Contra-Guzmán, S., & Delgado-Huertas, A. (2021). Disentangling the environmental processes responsible for the world's largest farmed fish-killing harmful algal bloom: Chile, 2016. *Science of The Total Environment*, 766, 144383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144383>
 23. Mitchell, S. O., Baxter, E. J., Holland, C., & Rodger, H. D. (2012). Development of a novel histopathological gill scoring protocol for assessment of gill health during a longitudinal study in marine-farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture International*, 20(5), 813–825. <https://doi.org/10.1007/s10499-012-9504-x>

24. Montes, R. M., Rojas, X., Artacho, P., Tello, A., & Quiñones, R. A. (2018). Quantifying harmful algal bloom thresholds for farmed salmon in southern Chile. *Harmful Algae*, 77, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2018.05.004>
25. Montory, J. A., Wiff, R., Camus, P. A., & Narváez, P. (2020). Early development and metabolic rate of the sea louse *Caligus rogercresseyi* under different scenarios of temperature and pCO₂. *Marine Environmental Research*, 162, 105154. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105154>
26. Muñoz, P. (1987). Effects of the 1982–1983 El Niño on the marine phytoplankton off northern Chile. *Journal of Geophysical Research*, 92(C13), 14069–14082. <https://doi.org/10.1029/JC092iC13p14069>
27. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2026). ENSO: Recent evolution, current status and predictions. National Centers for Environmental Prediction. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina/enso_evolution-status-fcsts-web.pdf
28. Østevik, L., Nilsen, R., Weli, S. C., Kristoffersen, A. B., Kanapathippillai, S., Fredriksen, B. N., & Nylund, A. (2022). A cohort study of gill infections, gill pathology and gill-related mortality in sea-farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.): A descriptive analysis. *Journal of Fish Diseases*, 45(9), 1301–1321. <https://doi.org/10.1111/jfd.13662>
29. Rozas-Serri, M. (2022). Why does *Piscirickettsia salmonis* break the immunological paradigm in farmed salmon? Biological context to understand the relative control of piscirickettsiosis. *Frontiers in Immunology*, 13, 856896. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.856896>
30. Stehfest, K. M., Carter, C. G., McAllister, J. D., Ross, J. D., & Semmels, J. M. (2017). Response of Atlantic salmon *Salmo salar* to temperature and dissolved oxygen extremes established using animal-borne environmental sensors. *Scientific Reports*, 7, 4545. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04806-2>
31. Villanueva, F., Urrutia, G., Uribe, C., Seguel, M., Aguilera, A., Olivares, B., Varela, D., & Paredes, J. (2016). Harmful algal bloom of *Pseudochattonella verruculosa* (Dictyochophyceae, Floridiales) associated with salmon farm mortalities in the south of Chile. En *Proceedings of the 17th International Conference on Harmful Algal Blooms* (pp. 42–45). International Society for the Study of Harmful Algae, Florianópolis, Brasil.
32. Yarimizu, K., Kienzie, M., Yamamoto, M., Tenenhaus-Aziza, F., Serot, T., & Blier, P. Y. (2020). Protocols for monitoring harmful algal blooms for sustainable aquaculture. *Frontiers in Marine Science*, 7, 581173. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.581173>

